

## یادداشت پژوهشی

# تأثیر سیمان و آهک بر تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالت

## بازیافتی به روش سرد با امولسیون قیر

یونس نیازی، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

مرتی جلیلی قاضی‌زاده، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

E-mail: Jalili.m@engineer.com

### چکیده:

تغییر شکل‌های دائمی (شیارشده‌گی) یکی از مشکلات اساسی در مخلوط‌های بازیافتی است و معمولاً این خرابی در مقایسه با روسازی‌های آسفالت گرم زودتر اتفاق می‌افتد. برای رفع این مشکل از افزودنی‌هایی نظیر سیمان و آهک در مخلوط‌های بازیافتی استفاده می‌شود. در این تحقیق از سیمان پرتلند و آهک به عنوان دو نوع افزودنی که در بازیافت آسفالت به روش سرد با امولسیون قیر بیشتر بکار رفته‌اند، استفاده شده است. سیمان پرتلند به صورت پودر و آهک به دو صورت دوغاب آهک و پودر آهک شکفته به مخلوط افزوده شد و تأثیر هر کدام بر تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های بازیافتی با استفاده از آزمایش‌های مارشال، ضریب برجه‌ندگی، خزش دینامیکی و ماشین اثر چرخ (ویل تراک) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقایسه‌ای بین این دو نوع افزودنی انجام شده است. نتایج به دست آمده در این پژوهش حاکی از آن است که میزان تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های بدون افزودنی نسبت به مخلوط‌های حاوی سیمان و آهک بسیار بیشتر بوده و افزودن سیمان پرتلند و آهک باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های بازیافتی و در نتیجه کاهش شیارشده‌گی می‌شود. بیشترین کاهش در تغییر شکل‌های دائمی مربوط به نمونه‌های حاوی سیمان و دوغاب آهک است که کاهش حدود ۵۰٪ را نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی نشان می‌دهد. نظر به نتایج به دست آمده و این که نحوه افزودن سیمان در قیاس با دوغاب آهک از سهولت بیشتری برخوردار است استفاده از سیمان برای کاهش تغییر شکل‌های دائمی در مخلوط‌های بازیافتی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط‌های آسفالتی، بازیافت سرد، افزودنی‌های سیمان پرتلند و آهک و امولسیون قیر

### ۱. مقدمه

روش‌های متداول در ترمیم و بهسازی و روکش مجدد راه است. استفاده از مواد افزودنی برای بهبود خواص مخلوط‌های بازیافتی از اوایل دهه هفتاد میلادی مورد توجه محققین قرار گرفته است. تجربیات گذشته نشان داده‌اند که روسازی‌های بازیافتی با انتخاب درست نوع افزودنی، عملکرد بهتری خواهند داشت. [۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶]. برای نمونه در عملیات بازیافت اگر تنها از آب استفاده شود (برای کمک به متراکم کردن مخلوط) بسیار ارزان تر از استفاده از امولسیون قیر است. از سوی دیگر اگر منافع حاصل از

امروزه به دلیل افزایش هزینه‌های ساخت و نگهداری راه، مشکلات تهیه مواد اولیه مرغوب و نیز کمبود منابع مالی، بازیافت مصالح روسازی فرسوده به طور جدی مد نظر سازمان‌های ذیربط قرار گرفته است. هدف اصلی از بازیافت آسفالت، استفاده مجدد از مصالح به منظور ترمیم و بهسازی روسازی است. مهم‌ترین مزایای بازیافت، صرفه‌جویی منابع مالی و مصالح است. بازیافت آسفالت به روش سرد در محل یکی از روش‌های بازیافتی روسازی‌های انعطاف‌پذیر است که هزینه آن ۵۰ تا ۶۰ درصد هزینه

تغییر شکل‌های دائمی (شیارشده‌گی) یکی از مشکلات اساسی در مخلوط‌های بازیافتی است و معمولاً این خرابی در مقایسه با روسازی‌های آسفالت گرم زودتر اتفاق می‌افتد [۲، ۱ و ۴]. شیارشده‌گی به تغییر شکل‌های دائمی گفته می‌شود که به صورت شیار فرورفته در مسیر چرخ وسایل نقلیه به موازات محور طولی راه دیده می‌شود [۷]. عامل اصلی شیارشده‌گی، تغییر شکل‌های دائمی در لایه‌های روسازی یا بستر تحت بار ترافیک است. هنگامی که در روسازی شیارشده‌گی مشاهده می‌شود، منشاء آن می‌تواند هر یک از لایه‌های روسازی باشد [۸]. انتخاب روش آزمایش مناسب برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم بسیار مهم است. زیرا تغییر شکل‌های دائمی ناشی از عوامل مختلفی است [۷]. امروزه با توجه به اهمیت شیارشده‌گی در کاهش عمر مفید روسازی و ایجاد خطر در حرکت وسایل نقلیه، وجود تجهیزات و روش مناسب در آزمایشگاه برای پیش‌بینی پتانسیل شیارشده‌گی در شرایط واقعی راه و ترافیک بسیار حایز اهمیت است. آزمایش‌هایی نظیر آزمایش مارشال، آزمایش خزش استاتیک<sup>۱</sup> و دینامیک<sup>۲</sup> و آزمایش ماشین اثر چرخ<sup>۳</sup> برای ارزیابی مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های دائم بکار می‌روند. در تحقیق حاضر برای ارزیابی تأثیر سیمان و آهک بر تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های بازیافتی از آزمایش‌های مارشال (ASTM D 1559)، خزش دینامیکی (BS-DD226) و ماشین اثر چرخ (BS 598:Part110:1996) استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات امولسیون قیر مصرفی

شماره استاندارد	نوع امولسیون قیر		نام آزمایش
	دیرشکن (CSS)	کندشکن (CMS)	
ASTM D 244	۶۰	—	کندروانی سی بولت- فیورل در دمای ۲۵ °C (ثانیه)
	—	۲۰۰	کندروانی سی بولت- فیورل در دمای ۵۰ °C (ثانیه)
	۱	۱	پایداری (درصد نشست پس از ۲۴ ساعت)
	۲	—	درصد قیر شکسته شده (آزمایش اختلاط با سیمان)
	۶۰	۶۵	درصد وزنی قیر
	۹۰	۶۵	درجه نفوذ قیر پس مانده

## ۲. مصالح

مصالح خرده آسفالتی در این تحقیق از باند غربی کیلومتر ۱۵ محور چناران - قوچان که در دست بهسازی و روکش آسفالت می‌باشد، برداشت شد. دو نوع امولسیون قیر کندشکن (CMS) و

استفاده صحیح از افزودنی‌ها یعنی عمر بیشتر روسازی مد نظر قرار گیرد، بکار بردن آنها توجیه‌پذیر خواهد بود [۲]. بکار بردن امولسیون قیر در پروژه‌های بازیافت آسفالت به روش سرد در محل، نتایج خوبی به همراه داشته است [۳]. اما در برخی از این پروژه‌ها مشکلاتی نظیر تغییر شکل‌های دائمی بیش از حد مجاز، خرابی‌های ناشی از رطوبت و ترک‌های حرارتی مشاهده شده است [۱ و ۴]. در این راستا افزودنی‌هایی مانند سیمان، آهک و خاکستر بادی به منظور بهبود خواص مخلوط‌های بازیافتی نظیر دوام، مقاومت در برابر ترک خوردگی، تغییر شکل‌های دائمی و حساسیت نسبت به رطوبت، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵ و ۶]. در زمینه تأثیر افزودنی‌ها بر خواص آسفالت‌های بازیافتی، تحقیقات جامعی انجام نشده، برای نمونه در سال ۱۹۹۷، A. Cross and David A. Young Stephen تحقیقاتی بر روی تأثیر خاکستر بادی بر مخلوط‌های بازیافتی انجام دادند و در کنار آن از آهک نیز استفاده کردند، اما تنها دوام مخلوط‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت [۱]. در تحقیقی دیگر در سال ۱۹۹۹ توسط Stephen A. Cross نیز تأثیر آهک بر خواص مخلوط‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت، ولی در این پژوهش تنها از دوغاب آهک استفاده شد [۳]. در سال ۲۰۰۱ Ritta Issa [et al] تأثیر سیمان را بر روی مخلوط‌های بازیافتی ارزیابی کردند، ولی در این تحقیق فقط از سیمان به‌عنوان افزودنی استفاده شد و همچنین تغییر شکل‌های دائمی که یکی از عمده‌ترین خرابی‌های روسازی‌های بازیافتی است مورد ارزیابی قرار نگرفت [۶]. بنابراین ضرورت پژوهش بیشتر در زمینه تأثیر افزودنی‌ها بر خواص مخلوط‌های بازیافتی به چشم می‌خورد. در تحقیق حاضر از سیمان و آهک به‌عنوان دو نوع افزودنی که در بازیافت آسفالت به روش سرد با امولسیون قیر، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بهره‌گیری شده است. سیمان پرتلند به صورت پودر و آهک به دو صورت دوغاب آهک و پودر آهک شکفته به مخلوط افزوده شد و تأثیر هر کدام بر تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این تحقیق بررسی تأثیر سیمان و آهک بر تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های بازیافتی و همچنین مقایسه‌ای بین این دو نوع افزودنی بود زیرا با توجه به مطالعات نویسنده‌گان، مقایسه‌ای بین این دو نوع افزودنی در تحقیقات گذشته انجام نشده است و به نظر می‌رسد که تحقیق حاضر جزء معدود تحقیقات در این زمینه باشد.

دیرشکن (CSS) نیز از گروه کارخانجات راهسازی و آسفالت نمونه تهیه شد که مشخصات آنها در جدول ۱ ارایه شده است.

## ۱-۲ ارزیابی مصالح خرده آسفالتی

اولین گام در طرح مخلوط، ارزیابی مصالح است [۹]. یکی از اهداف مهم این مرحله تشخیص کمبودهای آسفالت موجود و تعیین نیاز به مصالح جدید است [۱۰]. نخستین مرحله در ارزیابی مصالح خرده آسفالتی، تعیین دانه‌بندی مصالح است. به این منظور ابتدا مصالح خرده آسفالتی به چهار قسمت تقسیم شده و از هر قسمت سه نمونه ۲ کیلوگرمی تهیه شد و از الک ۲۵ میلی متر عبور داده شد و با استفاده از روش‌های استاندارد ASTM C 136, 137 [۱۱] دانه‌بندی مصالح تعیین شد. نتایج آزمایش دانه‌بندی در جدول ۲ ارایه شده است. بعد از این مرحله به منظور تعیین درصد قیر مصالح خرده آسفالتی از روش استاندارد ASTM D 2172 [۱۱] استفاده شد و درصد وزنی قیر نسبت به کل مخلوط ۵/۲۸٪ به دست آمد. پس از استخراج قیر از مصالح خرده آسفالتی، بر روی چهار نمونه ۱۰۰۰ گرمی از مصالح سنگی به دست آمده، آزمایش دانه‌بندی برطبق روش‌های استاندارد ASTM C 117, 136 [۱۱] انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارایه شده است. حال دانه‌بندی به دست آمده را با دانه‌بندی که انستیتو آسفالت [۱۲] توصیه کرده است و عیناً در نشریه ۳۳۹ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور [۱۳] آورده شده، مطابقت داده و در صورت نیاز، با افزودن مصالح سنگی جدید اصلاح می‌شود. دانه‌بندی مصالح سنگی از نوع توپر است، اما در هیچکدام از رده‌بندی‌های توصیه شده انستیتو آسفالت قرار نمی‌گیرد. بنابراین برای اصلاح آن و قرار گرفتن در یکی از رده‌بندی‌ها، مصالح سنگی جدید، به مصالح خرده آسفالتی

اضافه شد، اما به دلیل محدودیت در استفاده از مصالح سنگی در بازیافت آسفالت به روش سرد (در بازیافت آسفالت به روش سرد استفاده از مصالح سنگی جدید حداکثر تا ۲۵٪ وزن مصالح سنگی مجاز است [۱۳، ۱۲])، ۲۰٪ وزن کل مصالح سنگی، مصالح سنگی جدید اضافه شد که با توجه به درصد کم فیلر در مصالح خرده آسفالتی، ۴٪ فیلر و ۱۶٪ مصالح مانده روی الک ۴/۷۵ میلی متر به مخلوط اضافه شد. به این ترتیب دانه‌بندی حاصل در رده D جدول مذکور قرار گرفت. دانه‌بندی مصالح سنگی جدید و اختلاط آن با دانه‌بندی مصالح سنگی به دست آمده از مصالح خرده آسفالتی در جدول ۲ نشان داده شده است.

## ۲-۲ انتخاب امولسیون قیر

انتخاب نوع امولسیون قیر از نظر سازگاری با مصالح سنگی و همچنین دانه‌بندی مصالح سنگی، حائز اهمیت است. برای بررسی سازگاری امولسیون قیر با مصالح خرده آسفالتی و مصالح سنگی جدید، نمونه‌هایی با دو نوع امولسیون قیر کندشکن و دیرشکن تهیه شد، به این ترتیب که سه نمونه با امولسیون قیر کندشکن (CMS) و سه نمونه با امولسیون قیر دیر شکن (CSS) که مقدار امولسیون قیر در هر مورد ۵٪ بود، تهیه شد. انتخاب ۵٪ امولسیون قیر صرفاً برای ارزیابی پوشش دانه‌های سنگی توسط امولسیون قیر است. سپس در هر مورد کیفیت مخلوط از نظر نحوه پوشش مصالح سنگی با امولسیون قیر به طور بصری مورد ارزیابی قرار گرفت که با توجه به مشاهدات، امولسیون قیر دیر شکن انتخاب شد که این انتخاب با توجه به دانه‌بندی توپر مخلوط، با توصیه انستیتو آسفالت [۱۲] مبنی بر انتخاب امولسیون قیر دیر شکن برای مخلوط‌های با دانه‌بندی توپر مطابقت دارد.

جدول ۲. دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی مصالح سنگی قدیم و جدید و مخلوط آنها

درصد عبوری				اندازه الک (mm)
ترکیب نهایی مصالح	مصالح سنگی جدید (۲۰٪ وزن کل مصالح سنگی)	مصالح سنگی استخراج شده (۸۰٪ وزن کل مصالح سنگی)	مصالح خرده آسفالتی	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵
۸۷/۳	۸۵	۱۰۰	۹۷/۵	۱۹
۸۹	۴۶	۹۸/۴	۹۰/۳	۱۲/۵
۷۵/۶	۲۲	۸۷/۵	۶۴/۸	۴/۷۵
۵۴/۹	---	۶۲/۲	۳۴/۱	۲/۳۶
۳۵/۵	---	۳۸/۵	۱۴/۳	۱/۱۸
۱۹	---	۱۸/۴	۳/۴	# ۵۰
۹/۲	۲۲	۶/۴	۰/۶	# ۲۰۰
۰	۰	۰	۰	فیلر

## ۳. طرح اختلاط

هدف اصلی از طرح اختلاط در بازیافت به روش سرد، تولید مخلوط مشابه با مخلوطی است که کاملاً با مصالح جدید ساخته شده باشد [۱۲]. امروزه روش عمومی و مشترکاً قابل پذیرش برای طرح اختلاط در جهان وجود ندارد [۱۲، ۱۴ و ۱۵]. هرچند مراحل مشابهی در اکثر روش‌های طرح مشاهده می‌شود [۱۶]. با این وجود برخی از مؤسسات تحقیقاتی روش‌هایی را ارائه کرده‌اند که برخی از آنها عبارتند از: روش اتحادیه بازیابی و بازیافت آسفالت، روش اصلاح شده مارشال، روش کالیفرنیا، اورگان، پنسیلوانیا، انستیتو آسفالت، و روش‌های جدیدی که در حال ظهور هستند [۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸].

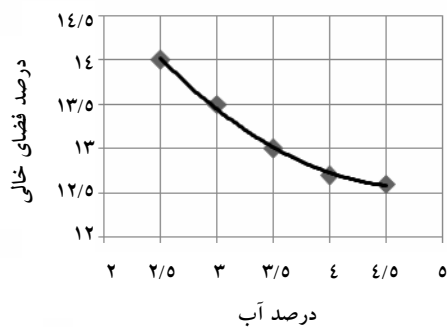
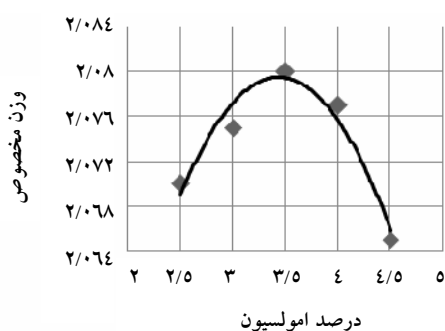
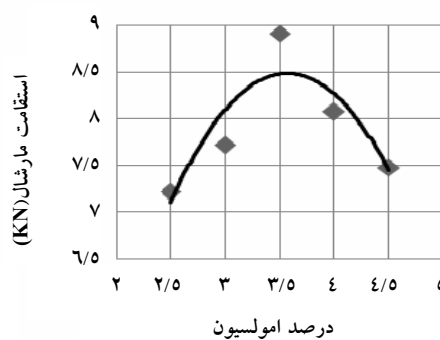
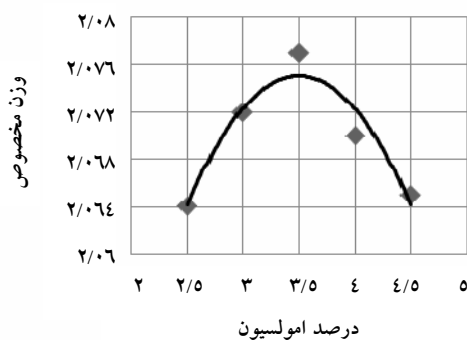
در تحقیق حاضر روش طرح اختلاط اصلاح شده مارشال برای مخلوط‌های بازیافتی به دلیل متداول بودن و همچنین امکانات آزمایشگاهی موجود، مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این روش طرح، ابتدا نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف امولسیون قیر (۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵) و درصد ثابت آب (۳٪) نسبت به وزن کل مخلوط ساخته شدند، سپس با توجه به حداکثر استقامت مارشال و حداکثر وزن مخصوص، درصد امولسیون قیر بهینه ۳/۵٪ وزن کل مخلوط تعیین شد. پس از تعیین درصد امولسیون قیر بهینه،

نمونه‌هایی با درصد امولسیون قیر بهینه و درصد‌های مختلف آب (۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵) تهیه و سپس با استفاده از نتایج آزمایش وزن مخصوص و درصد فضای خالی (درصد فضای خالی نمونه‌های بازیافتی بایستی بین ۹ تا ۱۴ درصد باشد)، درصد بهینه آب اختلاط ۳/۶٪ وزن کل مخلوط انتخاب شد. برای تعیین درصد امولسیون قیر بهینه ۲۵ نمونه مارشال و برای تعیین درصد آب اختلاط، ۱۵ نمونه مارشال تهیه شد که نتایج آزمایش در شکل ۱ ارائه شده است.

## ۴. بررسی آزمایشگاهی تأثیر سیمان و آهک بر

## تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های بازیافتی

در این پژوهش با توجه به تحقیقات گذشته [۶، ۲، ۱]، از سیمان پرتلند تیپ دو به صورت پودر و از آهک به دو صورت دوغاب و پودر آهک شکفته استفاده و درصد هر کدام از این افزودنی‌ها ۲٪ وزن کل مخلوط انتخاب شد. سپس تأثیر سیمان و آهک بر تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های بازیافتی با استفاده از آزمایش‌های مارشال (ASTM D 1559)، خزش دینامیکی (BS-DD226) و ماشین اثر چرخ (BS 598:Part110:1996) مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر آزمایش‌های فوق، مدول برجهنگی نمونه‌ها (ASTM D 4123) نیز تعیین شد.



شکل ۱. نتایج طرح اختلاط

#### ۴-۱ روش ساخت، تراکم و عمل‌آوری نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌های حاوی سیمان و آهک شکفته، ابتدا آب اختلاط به مصالح خرد آسفالتی اضافه شد، سپس سیمان و یا آهک شکفته، افزوده شده و توسط مخلوط کن به خوبی مخلوط شد و سرانجام امولسیون قیر را که به مدت یک ساعت در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  گذاشته شده بود به مخلوط اضافه شد. در مورد نمونه‌های حاوی دوغاب آهک نیز به روشی مشابه آنچه عنوان شد عمل گردید، با این تفاوت که مقدار آب دوغاب را از آب اختلاط کسر نموده و سپس آب اختلاط را اضافه کرده و از این شیوه برای ساخت تمام نمونه‌ها در این تحقیق استفاده شده است.

به منظور متراکم کردن نمونه‌ها، از آنجا که آزمایش‌های مورد استفاده در این تحقیق دارای قالب‌هایی با ابعاد متفاوتی بودند نیاز به روش‌های متفاوتی برای متراکم کردن آنها بود. به این ترتیب که برای متراکم کردن نمونه‌های مارشال از چکش مارشال با تعداد ۵۰ ضربه به هر طرف نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌های آزمایش مدول برجهنگی و خزش دینامیک با استفاده از دستگاه متراکم کننده چرخشی روسازی ممتاز<sup>۲</sup>، متراکم شد و به منظور متراکم کردن نمونه‌های آزمایش ماشین اثر چرخ از غلطک دستی استفاده شد. تمامی نمونه‌ها بعد از عمل تراکم به مدت ۲۴ ساعت درون قالب‌هایشان در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  و در گرمخانه قرار داده شدند. سپس در دمای محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده و پس از این مرحله نمونه‌ها را از قالب‌ها بیرون آورده و به مدت ۵ روز در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند.

#### ۴-۲ آزمایش مارشال

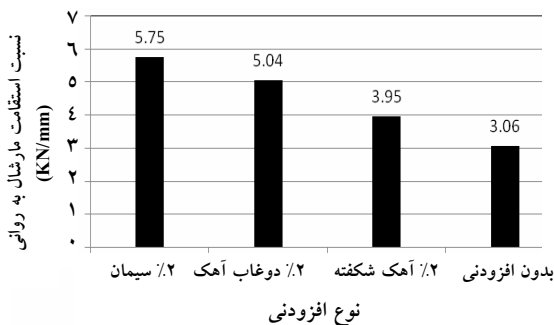
دو ویژگی در این آزمایش تعیین می‌شود که عبارتند از بیشترین باری که نمونه بدون گسیختگی می‌تواند تحمل کند (استقامت مارشال) و میزان تغییر شکلی که در نمونه در لحظه شکست رخ می‌دهد (روانی مارشال). یک مفهوم دیگر که بعضی از مواقع برای ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی بکار می‌رود، شاخص سختی مارشال است که عبارتست از نسبت استقامت مارشال به روانی آن که مقداری تجربی برای سختی مخلوط‌های آسفالتی است. مقادیر بالاتر شاخص سختی مارشال نشان‌دهنده مخلوط سخت‌تر بوده و حاکی از آن است که احتمالاً مخلوط دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائم است [۱۹].

برای انجام آزمایش مارشال ۲۰ نمونه با درصد آب بهینه (۳/۶٪) و امولسیون قیر بهینه (۳/۵٪) تهیه شد که از این تعداد ۵ نمونه با ۲٪ سیمان پرتلند، ۵ نمونه با ۲٪ دوغاب آهک، ۵ نمونه با ۲٪ آهک شکفته و ۵ نمونه بدون افزونی بودند. سپس نمونه‌ها تحت آزمایش مارشال قرار گرفتند. نتایج آزمایش مارشال در جدول ۳ و شاخص سختی مارشال در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش مارشال مخلوط‌های بازیافتی

نوع افزودنی	درصد افزودنی نسبت به وزن مخلوط	وزن مخصوص	درصد فضای خالی	استقامت مارشال (KN)	روانی (mm)
سیمان پرتلند	۲	۲/۰۹۸	۱۲/۴	۱۲/۸۳	۲/۲۳
آهک شکفته	۲	۲/۰۹۴	۱۱/۹	۱۰/۴۷	۲/۶۵
دوغاب آهک	۲	۲/۱۰۷	۱۱/۶	۱۲/۱	۲/۴۰
بدون افزودنی	۰	۲/۰۵۹	۱۳/۴	۹/۴۷	۳/۰۷

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود با افزودن سیمان و آهک، وزن مخصوص نمونه‌ها افزایش یافته که این مطلب را می‌توان با پر شدن فضاهای خالی مخلوط توسط افزودنی‌ها، توجیه کرد و این نشان‌دهنده کاهش درصد فضای خالی نمونه‌هاست که نتایج آزمایش درصد فضای خالی نمونه‌ها نیز مؤید این مطلب است.



شکل ۲. شاخص سختی مارشال نمونه‌های بازیافتی

نتایج آزمایش مارشال نشان می‌دهد که استقامت مارشال نمونه‌ها با افزودن سیمان و آهک افزایش می‌یابد، اما این افزایش در مورد نمونه‌های با آهک شکفته چندان محسوس نیست. برای مثال با افزودن ۲٪ آهک شکفته به مخلوط تنها ۱۱٪ استقامت مارشال نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی افزایش می‌یابد،

بارگذاری صورت می‌گیرد و یک ثانیه بعدی نیز زمان استراحت است. کرنش نمونه در هر دو مرحله اعمال تنش استاتیکی و چرخه‌های بارگذاری توسط دو ریز تغییر شکل‌سنج خطی در راستای محور بارگذاری اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۳. دستگاه UTM\_14P

برای انجام آزمایش خزش دینامیکی ۲۰ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر با درصد آب و امولسیون قیر بهینه تهیه شد که از این تعداد ۵ نمونه با ۲٪ سیمان پرتلند، ۵ نمونه با ۲٪ دوغاب آهک، ۵ نمونه با ۲٪ آهک شکفته و ۵ نمونه بدون افزودنی بودند. شکل ۴ منحنی‌های تغییر شکل دائمی نمونه‌های بازیافتی را بر حسب چرخه‌های بارگذاری نشان می‌دهد. حداکثر مقدار تغییر شکل دائمی نمونه‌ها نیز در شکل ۵ ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده دیده می‌شود که استفاده از افزودنی‌ها باعث کاهش در میزان تغییر شکل‌های دائمی نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی شده است و این کاهش برای نمونه‌های با دوغاب آهک، آهک شکفته و سیمان به ترتیب برابر با ۲۶، ۳۰ و ۴۰ درصد است.

#### ۴-۴ آزمایش ماشین اثر چرخ

آزمایش شیارشدگی با ماشین اثر چرخ برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار در دمای بحرانی و تحت بارگذاری شبیه به آنچه که در جاده‌ها به سطح روسازی وارد می‌شود، بکار می‌رود. این آزمایش هم می‌تواند بر روی مغزه‌های استوانه‌ای گرفته شده از آسفالت جاده‌ها و هم دال آسفالتی ساخته شده در آزمایشگاه صورت پذیرد. ماشین اثر چرخ با حرکت رفت و برگشت چرخ بارگذاری شده روی نمونه

در حالی که این افزایش برای نمونه‌های حاوی دوغاب آهک و سیمان به ترتیب ۲۸٪ و ۳۵٪ است. نتایج این آزمایش همچنین نشان می‌دهد که با افزودن سیمان و آهک به مخلوط، روانی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. بالا بودن استقامت و کمتر بودن روانی در شرایط استفاده از مصالح یکسان نشان‌دهنده استحکام بیشتر در برابر تنش و مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل است.

نسبت استقامت مارشال به روانی نمونه‌ها (شاخص سختی مارشال) نیز نشان می‌دهد که با افزودن سیمان و آهک این نسبت افزایش می‌یابد، به طوری که شاخص سختی مارشال نمونه‌های حاوی سیمان، دوغاب آهک و آهک شکفته نسبت به شاخص سختی مارشال نمونه‌های بدون افزودنی به ترتیب ۲۹، ۶۹ و ۸۸٪ افزایش یافته است که این مطلب می‌تواند نشان‌دهنده مقاومت اولیه بالای نمونه‌های حاوی آهک و سیمان و در نتیجه کاهش تغییر شکل‌های دائمی نمونه‌ها باشد.

#### ۴-۳ آزمایش خزش دینامیک

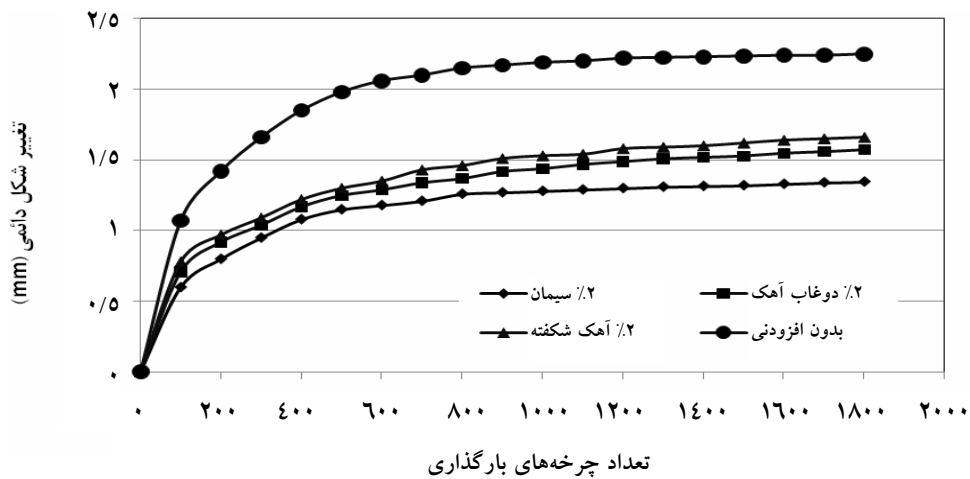
آزمون خزش معمولاً برای تخمین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از اعمال بار استاتیکی و یا دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالتی و اندازه‌گیری تغییر شکل‌های دائمی در طول زمان، انجام می‌گیرد [۲۰]. آزمایش خزش استاتیکی که در اوایل دهه ۷۰ میلادی معرفی شد برای تخمین پتانسیل تغییر شکل‌های دائمی در مسیر چرخهای وسایل نقلیه و رده‌بندی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مقاومت آنها در برابر تغییر شکل‌های دائم مورد استفاده قرار گرفت [۷ و ۲۰]. اما امروزه مشخص شده است که برای شبیه‌سازی بهتر با شرایط عملی، اعمال بار بایستی به صورت تکراری باشد، بنابراین آزمایش خزش دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است [۷]. در این آزمایش با اعمال بار تکراری محوری بر روی نمونه آسفالتی، تغییر شکل‌ها در همان جهت اعمال بار با استفاده از ریز تغییر شکل‌سنج‌ها<sup>۱</sup> اندازه‌گیری می‌شود [۲۱].

آزمایش خزش دینامیکی به وسیله دستگاه UTM<sup>۱</sup> (شکل ۳) طبق پیش‌نویس استاندارد BS-DD226 انجام شد. این آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر در دمای  $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$  و تحت تنش استاتیکی آماده‌سازی<sup>۲</sup> ۱۰ کیلو پاسکال در مدت ۶۰۰ ثانیه و پالس‌های تکراری بارگذاری برای ۱۸۰۰ چرخه و با تنش برابر با ۱۰۰ کیلو پاسکال صورت گرفت. مدت زمان پالس‌ها ۲ ثانیه است که در ۱ ثانیه آن

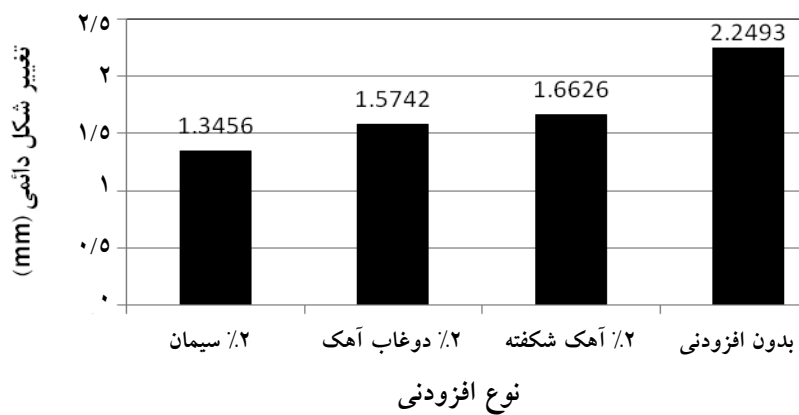
## تأثیر سیمان و آهک بر تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی به روش سرد با امولسیون قیر

شده است، وزن مصالح مورد نیاز برای ساخت دال آسفالتی محاسبه می‌شود. سپس با توجه به درصد وزنی امولسیون قیر، مصالح سنگی، آب و افزودنی، وزن هر کدام جهت آماده‌سازی نمونه تعیین شد. قبل از شروع آزمایش لازم است نمونه به مدت ۴ تا ۱۶ ساعت در دمای  $45 \pm 1^\circ\text{C}$  نگهداری شود. پس از گذشت این زمان، نمونه آماده انجام آزمایش است. برای انجام آزمایش باید نمونه را داخل ماشین اثر چرخ قرار داده و پس از انجام تنظیمات لازم از طریق نرم افزار موجود در رایانه متصل به دستگاه آزمایش را آغاز کنیم. طبق استاندارد بار وارد به نمونه از طریق چرخ دستگاه باید  $520\text{N}$  باشد.

آسفالتی به تعیین پتانسیل شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی می‌پردازد. این کار با اندازه‌گیری عمق شیار ایجاد شده در نمونه در امتداد حرکت چرخ دستگاه در فواصل زمانی مشخص صورت می‌پذیرد. انجام آزمایش تا رسیدن به میزان شیار  $15\text{ mm}$  یا زمان ۴۵ دقیقه (هرکدام زودتر فرا برسد) ادامه می‌یابد. ماشین اثر چرخ مورد استفاده در این تحقیق ساخت شرکت مهندسی وسکس (Wessex) است. پارامترهای انجام آزمایش در این دستگاه مطابق با پیش‌نویس استاندارد BS 598:Part110:1996 است. برای ساخت نمونه‌ها، با توجه به ابعاد قالبی که دال در آن ساخته می‌شود (با ابعاد  $305 \times 305 \times 50$  میلیمتر) و همچنین وزن مخصوص مخصوص نمونه آسفالتی ( $G_{mb}$ ) که در آزمایش مارشال محاسبه



شکل ۴. منحنی‌های تغییر شکل دائم نمونه‌های بازیافتی بر حسب سیکل‌های بارگذاری در آزمایش خزش دینامیکی

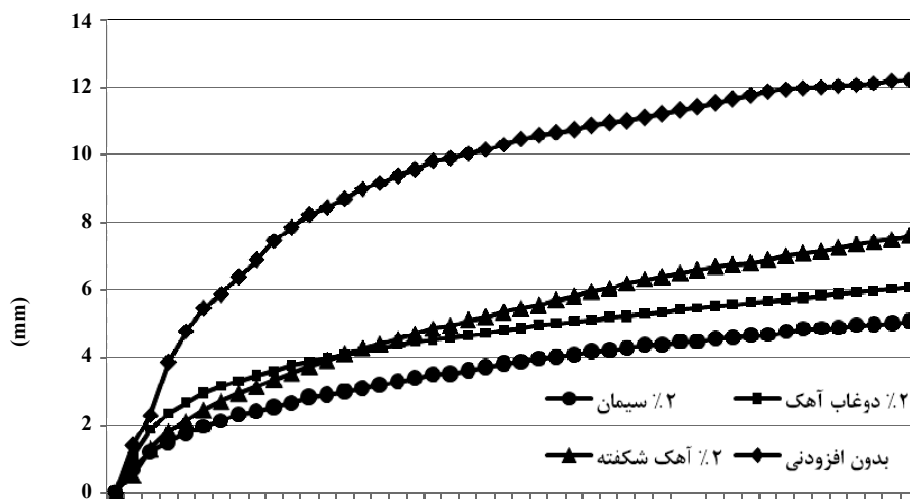


شکل ۵. نتایج آزمایش خزش دینامیکی (در دمای  $30^\circ\text{C}$  و پس از ۱۸۰۰ چرخه بارگذاری و بار برداری)

## نیازی و جلیلی قاضی زاده

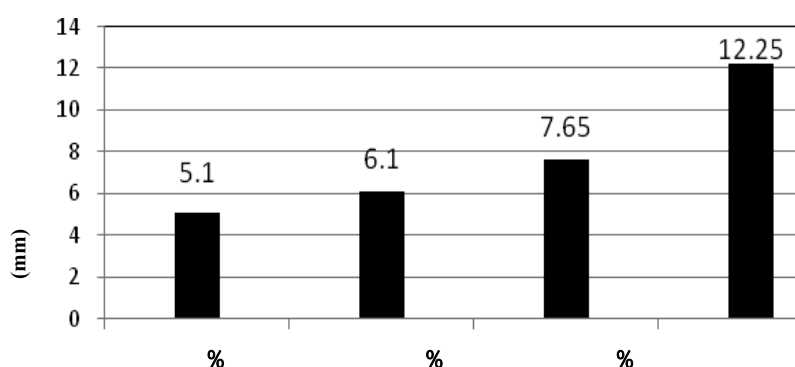
افزودنی بسیار کمتر از نمونه‌های بدون افزودنی است که این مطلب در مورد نمونه‌های حاوی سیمان بسیار قابل توجه است، زیرا کاهش شیارشدگی نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی به حدود ۶۰٪ می‌رسد. مقدار کاهش شیارشدگی برای نمونه‌های حاوی دوغاب آهک و آهک شکفته به ترتیب حدود ۵۰٪ و ۳۸٪ می‌باشد که نشان‌دهنده نقش مؤثر این افزودنی‌ها در کاهش شیارشدگی است.

در این آزمایش ۳ دال برای نمونه‌های بازیافتی با ۲٪ دوغاب آهک، ۳ دال برای نمونه‌های بازیافتی با ۲٪ آهک شکفته، ۳ دال برای نمونه‌های بازیافتی با سیمان و ۳ دال برای نمونه‌های بازیافتی بدون افزودنی تهیه شد. شکل ۶ منحنی‌های تغییر شکل دائمی نمونه‌های بازیافتی را برحسب زمان نشان می‌دهد. حداکثر مقدار عمق شیارشدگی نمونه‌ها نیز در شکل ۷ ارایه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود شیارشدگی نمونه‌های حاوی



( )

شکل ۶. منحنی تغییرات شیارشدگی نمونه‌های آسفالت بازیافتی بر حسب زمان در آزمایش ماشین اثر چرخ (در دمای ۴۵ °C)



شکل ۷. حداکثر عمق شیارشدگی نمونه‌های آسفالت بازیافتی بر حسب زمان در آزمایش ماشین اثر چرخ (در دمای ۴۵ °C)



#### ۴-۵ آزمایش مدول برجهندگی

در این تحقیق مدول برجهندگی نمونه‌ها با پیروی از روش استاندارد ASTM D 4123 [۱۱] اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمایش مدول برجهندگی ۲۰ نمونه با درصد آب و امولسیون قیر بهینه تهیه شد که از این تعداد ۵ نمونه با ۲٪ سیمان پرتلند، ۵ نمونه با ۲٪ دوغاب آهک، ۵ نمونه با ۲٪ آهک شکفته و ۵ نمونه بدون افزودنی بودند.

آزمایش مدول برجهندگی با استفاده از دستگاه UTM-14P انجام شد. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، تعداد پیش بارگذاری ۲۰۰ سیکل، بار اعمالی ۱۲۰۰ نیوتن و ضریب پواسون ۰/۳۵ انتخاب شد و آزمایش در دو دمای ۲۵°C و ۵°C انجام گرفت. این اعداد بر اساس توصیه پروتکل SHRP P07 انتخاب شده است [۲۲]. در شکل ۸ نتایج آزمایش مدول برجهندگی آورده شده است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای افزودنی در قیاس با نمونه‌های بدون افزودنی، مدول برجهندگی بیشتری دارند که این موضوع در هر دو دمای ۲۵°C و ۵°C صادق است. افزایش مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی سیمان، دوغاب آهک و آهک شکفته نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی در دمای ۲۵°C به ترتیب برابر ۷۵، ۳۲ و ۲۷ درصد است. این افزایش در دمای ۵°C به ۱۲۶، ۷۰ و ۵۳ درصد می‌رسد. با توجه به نتایج آزمایش مدول برجهندگی نیز می‌توان ارتباطی با نتایج آزمایش تغییر شکل دائم برقرار کرد، به این ترتیب که با بالا رفتن مدول برجهندگی، نمونه‌ها سخت‌تر شده و مقاومت آنها در برابر تغییر شکل‌ها افزایش می‌یابد و همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین افزایش

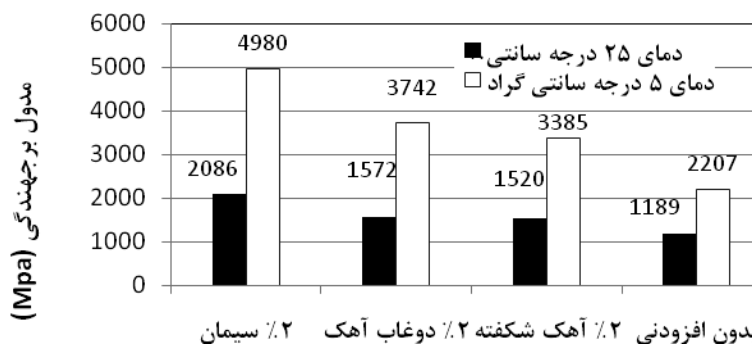
در مقدار مدول برجهندگی مربوط به نمونه‌های حاوی سیمان و بعد از آن نمونه‌های حاوی دوغاب آهک و آهک شکفته است که تأییدی است بر نتایج آزمایش‌های قبلی و می‌توان نتیجه گرفت که سیمان در کاهش تغییر شکل‌های دائمی مؤثرتر است.

#### ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق مجموعاً ۱۱۲ نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند که ۸۰ نمونه با ابعاد نمونه‌های مارشال برای آزمایش‌های مارشال و مدول برجهندگی، ۲۰ نمونه به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر برای آزمایش خزش دینامیکی و ۱۲ دال ۱۱ کیلویی برای آزمایش ماشین اثر چرخ مورد استفاده قرار گرفت. خلاصه نتایج آزمایش‌ها در ذیل ارائه می‌شود:

۱- نتایج آزمایش مارشال نشان می‌دهد که با افزایش درصد سیمان و آهک، استقامت و وزن مخصوص افزایش یافته و روانی و درصد فضای خالی کاهش می‌یابد. بالا بودن استقامت و کمتر بودن روانی در شرایط استفاده از مصالح یکسان، نشان‌دهنده استحکام بیشتر در برابر تنش و مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل است.

۲- شاخص سختی مارشال نمونه‌های بازیافتی حاوی افزودنی نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی افزایش یافته است که نشان‌دهنده مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل دائمی است. مقادیر شاخص سختی مارشال برای نمونه‌های حاوی سیمان، دوغاب آهک، آهک شکفته و نمونه‌های بدون افزودنی به ترتیب ۵/۰۴، ۳/۹۵ و ۳/۰۵ است.



شکل ۸. مدول برجهندگی نمونه‌های بازیافتی

## ۷. پانویس ها

- 1- Creep Static Test
- 2- Creep Dynamic Test
- 3- Wheel Tracker
- 4- Superpave Gyrotory Compactor
- 5- Linear Variable Differential Transducers
- 6- Universal Testing Machine
- 7- Conditioning

## ۸. مراجع

1. Cross, Stephen A. and Young, David A. (1997) "Evaluation of type C fly ash in cold in - place recycling" TRR 1583, pp 82-90.
2. Mallick, Rajib B. and Bonner, David S. (2002) "Evaluation of performance of full depth reclamation (FDR) mixes", 81<sup>st</sup> Annual Meeting of TRB.
3. Cross, Stephen A. (1999) "Experimental cold in-place recycling with hydrated lime" TRB, 78<sup>th</sup> Annual Meeting.
4. Thomas, Todd, Kadrams, Arlis and Huffman, John (2000) "Cold in-place recycling on Kansas US-283", 79<sup>th</sup> Annual Meeting of TRB'.
5. O'Leary, Michael D. and Williams, Robert D. (1992) "In situ cold recycling of bituminous pavements with polymer-modified high float emulsions" TRR 1342, pp. 20-25.
6. Issa, Rita [et.al] (2001) "Characteristics of cold processed asphalt millings and cement-emulsion composite", 80<sup>th</sup> Annual Meeting of TRB.
7. Tayfur, Sureyya, Ozen, Halit and Aksoy, Atakan (2007) "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers" Construction and Building Materials, 21, pp 328-337
8. Fang, Hongbing, Haddock, John E. White, Thomas D. and Jihand, Adham (2004) "On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis", Finite Element in Analysis and Design 41, pp 49-73.
9. Scholz, T.V. , Hicks, R.G. , Rogge, D.F. and Allen, Dale (1991) "Use of cold in-place recycling on low-volume roads", TRR 1291, pp 239-252.
10. Murphy, Daniel T. and Emery, John J. (1996) "Modified cold in-place asphalt recycling" TRR 1545, pp 143-150.

۳- نتایج آزمایش خزش نشان می دهد که سیمان مؤثرترین افزودنی در کاهش تغییر شکل های دائم است که منجر به کاهش شیارشدگی به میزان ۴۰٪ نسبت به نمونه های بدون افزودنی شده است. این کاهش برای نمونه های حاوی دوغاب آهک و آهک شکفته به ترتیب برابر ۳۰٪ و ۲۶٪ است که نشان دهنده تأثیر مثبت این افزودنی ها بر مخلوط در برابر شیارشدگی است.

۴- نتایج آزمایش ماشین اثر چرخ نشان می دهد که شیارشدگی مخلوط های حاوی سیمان، دوغاب آهک و آهک شکفته نسبت به نمونه های بدون افزودنی به ترتیب ۵۸، ۵۰ و ۳۸ درصد کاهش یافته است که نتایج آزمایش های خزش دینامیکی و مارشال را تأیید است.

۵- با توجه به نتایج آزمایش مدول برجهندگی نیز می توان ارتباطی با نتایج آزمایش تغییر شکل دائم برقرار کرد به این ترتیب که با بالا رفتن مدول برجهندگی، نمونه ها سخت تر شده و مقاومت آنها در برابر تغییر شکل ها افزایش می یابد. افزایش مدول برجهندگی برای نمونه های با سیمان، دوغاب آهک و آهک شکفته نسبت به نمونه های بدون افزودنی در دمای ۲۵°C به ترتیب ۷۵، ۵۳ و ۳۲ درصد است.

۶- مقایسه نتایج آزمایش های تغییر شکل دائم نشان می دهد که سیمان پرتلند و آهک در کاهش میزان شیارشدگی نقش مؤثری دارند، اما این نقش در مورد سیمان پرتلند بسیار پررنگ تر است زیرا سیمان پرتلند در مخلوط آسفالتی سرد به عنوان یک ماده چسبنده عمل کرده و در حضور آب واکنش های گرمایی (هیدراسیون) آن تسریع شده، واکنش های گرمایی سیمان پرتلند باعث افزایش حرارت در مخلوط و در نتیجه باعث افزایش واکنش میان مصالح سنگی و امولسیون می شود که هر دو عامل منجر به افزایش در نرخ شکستن امولسیون و در نتیجه زمان عمل آوری کوتاه تر آن می شود.

۷- نتایج تمامی آزمایش های مورد بررسی در این پژوهش نشان می دهند که تغییر شکل های دائمی مخلوط های بازیافتی بدون افزودنی بسیار زیاد است و بنابراین استفاده از افزودنی هایی مانند سیمان و آهک برای کاهش تغییر شکل های دائمی، اکیداً توصیه می شود. در این میان نقش سیمان پرتلند و دوغاب آهک بسیار پررنگ است که با توجه به مشکلات تهیه دوغاب آهک استفاده از سیمان پرتلند پیشنهاد می شود.

17. Saloman, A., and Newcomb, D. E. (2000) "Cold in-place recycling literature review and preliminary mixture design procedure", Minnesota Department of Transportation.
18. Brayton, T.E., Lee K., Gress D., and Harrington J. (2001) "Development of performance-based mix design for cold in-place recycling of asphalt mixtures", TRB annual meeting.
19. Brown, E.R., Kandhal, P. S., Zhang J. (2001) "Performance testing for hot mix asphalt", National Center for Asphalt Technology, NCAT, Report 01-05.
20. Abo-Quadis, Saad and Al-Shweily, Haidar (2007) "Effect of antistripping additives on environmental damage of bituminous mixtures", Building and Environment 42, pp 2929-2938.
21. Asi, Ibrahim M. (2007) "Performance evaluation of Superpave and Marshal asphalt mix design to suit Jordan climatic and traffic condition", Construction and Building Materials, 21, pp 1732-1740.
22. Katicha, Samer (2003) "Development of laboratory to field shift factors for hot-mix asphalt resilient modulus", M.S. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
11. Annual Book of ASTM Standards (1997), vol.04.03, vol.04.02.
12. The Asphalt Institute Series No.21 (MS-21) (1983) "Asphalt cold – mix recycling", First Edition
۱۳. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۸۵) "مشخصات فنی اجرایی بازیافت سرد آسفالت"، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله. نشریه شماره ۳۳۹.
14. Rogge, F., Hicks, R.G., Scholz, T.V. and Allen, Dale (1992) "Use of asphalt emulsions for in-place recycling: Oregon Experience", TRR 1342, pp 1-8.
15. Lee, K.W., Brayton, T.E. and Huston, M. (2002) "Development of mix- design for cold in-place recycling of bituminous pavements based on fundamental properties".
16. Asphalt Recycling and Reclamation Association. (2003) "Cold - mix asphalt recycling (material and mix design) (chapter 14)".